

环境因子对反硝化聚磷菌效能的影响

张晓昕, 李 昂, 孙移鹿, 马 放, 杨基先

(哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 150090 哈尔滨)

摘要: 为全面考察反硝化聚磷菌(DPB)在不同环境条件下的脱氮除磷效能,利用厌氧/好氧/缺氧(A/O/A-SBR)反应器,以人工配水培养驯化反硝化聚磷颗粒污泥.通过正交试验,综合考察不同碳源类型、碳源质量浓度、进水温度和pH条件下系统的脱氮除磷效能.结果表明:以丙酸钠为碳源,在进水COD质量浓度400 mg/L、水温25℃、pH为7的条件下,DPB对于有机物的去除效能最高;以丙酸钠为碳源、COD质量浓度400 mg/L、进水温度15℃、pH为7条件下,DPB的脱氮效能最高;以乙酸钠为碳源、COD质量浓度400 mg/L、进水温度25℃、pH为8时,DPB的除磷效能最高.温度对系统COD降解和脱氮效能影响最大,pH的影响最小;pH对系统的除磷效能影响最大,碳源类型的影响最小.

关键词: 反硝化聚磷菌;脱氮除磷;环境因子;正交试验

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)08-0039-05

Effect of environmental factors on the efficiency of denitrifying phosphorus removal bacteria

ZHANG Xiaoxin, LI Ang, SUN Yilu, MA Fang, YANG Jixian

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To investigate the effect of different environmental factors on the efficiency of denitrifying phosphorus removal bacteria (DPB), anaerobic/oxic/anoxic reactor (A/O/A-SBR) was used to culture the granular sludge. By designing the orthogonal test, the overall investigation of the biological nitrogen and phosphorus removal efficiency of DPB under various carbon source, carbon concentration, inlet water temperature and pH value was carried out. The results show that: when carbon source is sodium propionate, COD concentration is 400 mg/L, inlet water temperature is 25℃, and pH value is 7, the COD degradation efficiency of DPB is the highest; when carbon source is sodium propionate, COD concentration is 400 mg/L, inlet water temperature is 15℃, pH value is 7, the nitrogen removal efficiency of DPB is the highest; when carbon source is sodium acetate, COD concentration is 400 mg/L, inlet water temperature is 25℃, pH value is 8, the removal efficiency of soluble P is best. Temperature is the most influential factor for the COD and nitrogen removal, while the influence of pH is the minimum. The most influential factor for phosphorus removal of DPB is pH, and carbon source affects the minimum.

Key words: denitrifying phosphorus removal bacteria; nitrogen and phosphorus removal; environmental factors; orthogonal test

反硝化聚磷菌 (Denitrifying Phosphorus

removal Bacteria, DPB) 以及反硝化除磷技术的发现极大地提高了生物除磷工艺的效率^[1-3], 推动了生物脱氮除磷工艺的发展^[4-6]. 吴昌永等^[7]利用A²O工艺, 对处理低碳氮比生活污水时的反硝化除磷系统的运行参数进行了探讨. Jiang和Wang等^[8-9]考察了单一因子, 如SRT、碳源质量浓度等对DPB脱氮除磷效能的影响, 发现同步脱氮

收稿日期: 2012-05-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178139; 51108120); 第四批中国博士后特别资助项目(201104430); 第46批中国博士后科学基金资助项目(20090460901).

作者简介: 张晓昕(1986—), 女, 博士研究生;
马 放(1963—), 男, 教授, 博士生导师;
杨基先(1964—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 李 昂, ang.li.harbin@gmail.com.

除磷工艺的处理效果会因微生物对不同类型和质量浓度的碳源吸收利用程度而不同. 此外, 温度和 pH 分别能通过影响酶促反应速率和改变微生物细胞表面带电性以及通透性, 从而显著地影响生物处理工艺的运行效能^[10]. 但是对于各环境因子对反硝化聚磷菌脱氮除磷效能的综合影响至今尚待具体研究.

本文利用 SBR 反应器较为全面地考察了碳源类型、碳源质量浓度、进水温度和 pH 对反硝化聚磷菌效能的综合影响, 通过设计正交试验, 利用科学方法考察以上环境因子对于反硝化聚磷工艺的综合影响, 寻求以上环境因子的最优组合, 并总结反硝化聚磷工艺的运行调控策略, 为以反硝化聚磷菌为主体的生物脱氮除磷工艺的实际应用提供理论依据.

1 实验

1.1 实验装置

实验采用的 SBR 是圆柱形有机玻璃容器(直径 25 cm, 高 50 cm), 有效工作容积 19 L(图 1). 反应器底部设有微孔曝气装置, 通过电动搅拌器实现泥水混合, 搅拌速度为 100 r/min.

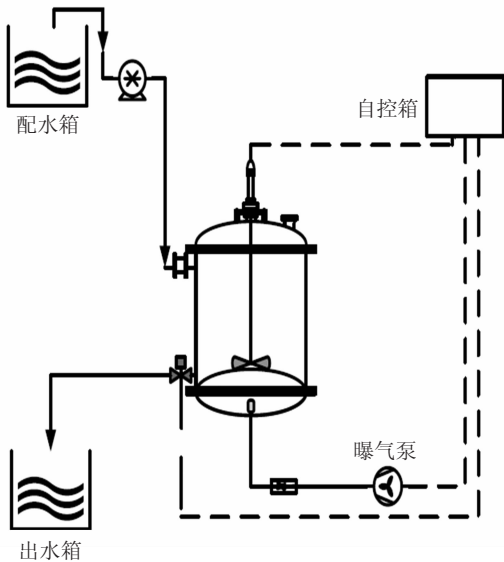


图 1 A/O/A-SBR 反应器装置示意图

1.2 实验方法

1.2.1 接种污泥与进水水质

反应器所用污泥取自哈尔滨市太平污水处理厂(A/O 工艺)曝气池, 初始污泥质量浓度约为 1 700 mg/L. 实验采用人工配水, 以乙酸钠为碳源(270 mg/L COD), 以 NH_4Cl 为氮源(75 ~ 55 mg/L $\text{NH}_4^+ - \text{N}$), 以 KH_2PO_4 为磷源(9 mg/L $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$), 以及 CaCl_2 (23 mg/L Ca^{2+}) 和 MgSO_4 (8 mg/L Mg^{2+}). 通过加入 HCl 或 NaOH 使 pH 控制在 7.0 ~

8.0. 反应器在厌氧/好氧/缺氧条件下每天运行 3 周期, 每周期 8 h, 连续运行 80 d, 试验时反应器内污泥质量浓度保持在 7 000 mg/L 左右. 反应器运行模式如表 1 所示.

表 1 反应器运行模式

厌氧/ min	好氧/ min	缺氧/ min	静沉/ min	排水/ min	曝气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
180	140	148	2	10	0.40

1.2.2 环境因子对系统脱氮除磷效能的正交试验设计

正交试验在 SBR 反应器中进行, 考察不同环境因子对 DPB 效能的影响(表 2). 根据已有研究成果, 选取进水碳源类型 A、进水碳源质量浓度 B、进水温度 C 和进水 pH D 作为考察因素. 选取乙酸钠、丙酸钠和葡萄糖作为 A 因素的 3 个考察水平(即 A1、A2、A3); 200, 300 和 400 mg/L 作为 B 因素的 3 个考察水平(即 B1、B2、B3); 5, 15 和 25 $^{\circ}\text{C}$ 作为 C 因素的 3 个考察水平(即 C1、C2、C3); pH 6, 7 和 8 作为因素 D 的 3 个考察水平(即 D1、D2、D3).

表 2 正交试验考察因素及其水平

不同 水平	影响因素			
	A	B	C	D
	碳源类型	ρ (碳源)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	pH
1	乙酸钠	200	5	6
2	丙酸钠	300	15	7
3	葡萄糖	400	25	8

根据所选的考察因素及水平, 采用正交表格 $\text{L}_9(3^4)$ (表示需作 9 次实验, 可观察 4 个因素, 每个因素均为 3 水平)^[11] 设计每组试验进水水质, 结果如表 3 所示. 除表 3 中给出的进水水质参数外, 其余均与 1.2.1 中给出的参数保持一致. 每组试验进行前, 反应器已在同种条件下连续运行 72 h, 以达到出水水质稳定效果.

表 3 正交试验设计

试验 编号	影响因素			
	碳源类型	ρ (碳源)/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	pH
1	乙酸钠	200	5	6
2	乙酸钠	300	15	7
3	乙酸钠	400	25	8
4	丙酸钠	200	15	8
5	丙酸钠	300	25	6
6	丙酸钠	400	5	7
7	葡萄糖	200	25	7
8	葡萄糖	300	5	8
9	葡萄糖	400	15	6

1.2.3 常规分析项目及检测方法

MLSS、COD、总氮、总磷和可溶性磷的测定均按照文献[12]方法进行。

2 结果与讨论

2.1 环境因子对周期内污染物去除的影响

正交试验进行中各阶段污染物去除情况见图 2。可以看出, 试验 1~9 反应器内初始 TN 和可溶性 P 质量浓度相同, 厌氧段末(180 min), 试验 3、5 的

厌氧释磷现象明显, 厌氧释磷量较大, 分别为 46.63 和 34.72 mg/L。好氧段末(320 min), 试验 8、9 反应器内可溶性 P 质量浓度最低, 好氧吸磷现象明显。反应周期结束(480 min), 试验 3 出水中 TN、可溶性 P 以及 COD 质量浓度最低, 分别达到 9.32, 0.19 和 17.71 mg/L, 即 DPB 对较高质量浓度乙酸钠的利用效果较好。而试验 7~9 的结果可以看出, 出水中 TN、可溶性 P 以及 COD 质量浓度普遍较高, 说明系统内微生物对葡萄糖的吸收利用效果较差。

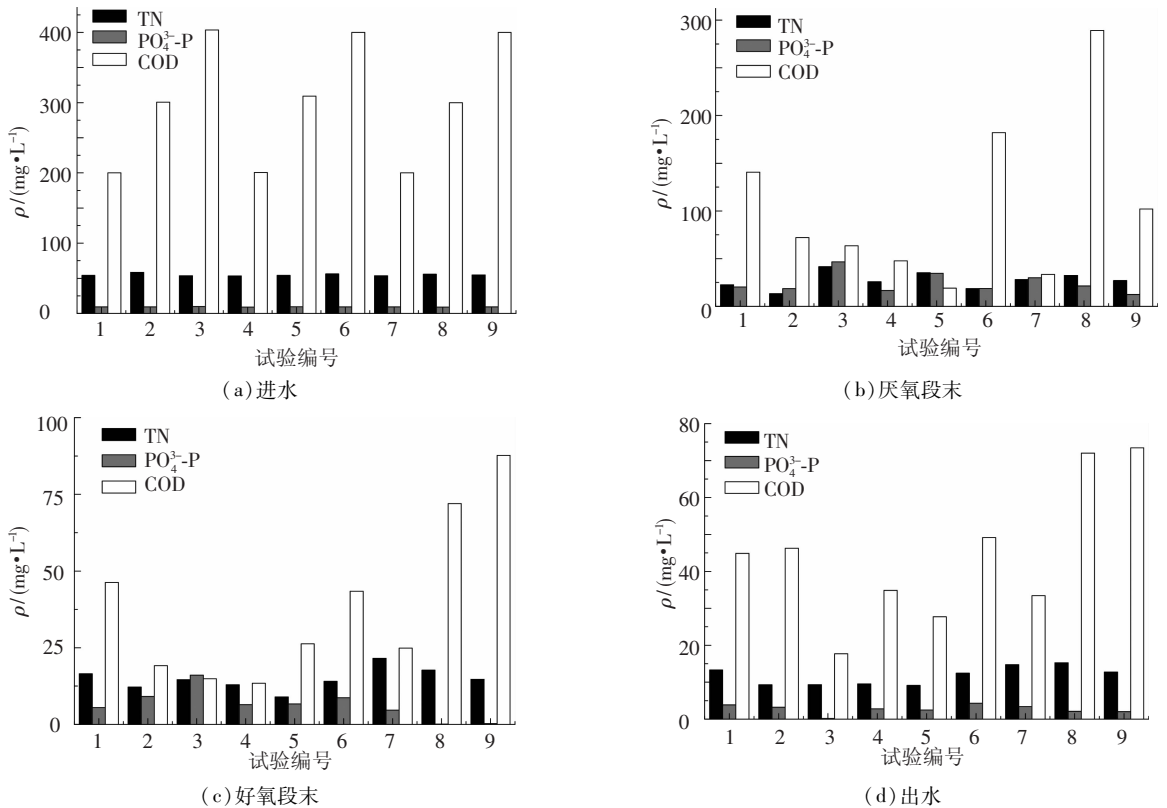


图 2 污染物反应周期内去除规律

2.2 环境因子对反硝化聚磷菌效能的综合影响

为考察使 DPB 对有机物降解效能最优的环境因子组合, 将各试验周期 COD 降解率以及 TN 和 TP 的去除率填入表格, 结果如表 4 所示。将试

验数据进行分析计算, 得到每一因素同一水平的结果之和 K_{ji} , 取其均值 k_{ji} , 以及各列因素的极差 R_j (即各列中 k_{ji} 值差的最大值), 获得同环境因子使 DPB 脱氮效能最优的组合, 结果如表 5 所示。

表 4 DPB 降解效能正交试验结果

编号	影响因素				去除率/%		
	A	B	C	D	COD	TN	TP
1	A1	B1	C1	D1	77.57	53.92	58.38
2	A1	B2	C2	D2	84.58	84.08	65.11
3	A1	B3	C3	D3	95.57	82.62	97.99
4	A2	B1	C2	D3	82.57	82.15	69.31
5	A2	B2	C3	D1	90.76	83.08	79.93
6	A2	B3	C1	D2	87.71	77.85	53.68
7	A3	B1	C3	D2	83.29	72.54	63.07
8	A3	B2	C1	D3	76.01	45.64	98.54
9	A3	B3	C2	D1	81.64	77.91	78.02

表 5 正交试验结果分析

参数	COD				TN				TP			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
K_{j1}	257.72	243.43	241.29	249.97	220.62	208.61	177.41	214.90	221.48	190.76	188.44	216.33
K_{j2}	261.04	251.35	248.79	255.58	243.08	212.80	244.13	234.47	202.92	221.42	212.44	181.86
K_{j3}	240.94	264.92	269.62	254.15	196.08	238.37	238.24	210.41	217.47	229.69	240.99	243.68
k_{j1}	85.91	81.14	80.43	83.32	73.54	69.53	59.14	71.63	73.83	63.59	62.81	72.11
k_{j2}	87.01	83.78	82.93	85.19	81.03	70.93	81.38	78.16	67.64	73.81	70.81	60.62
k_{j3}	80.31	88.30	89.87	84.71	65.36	79.45	79.41	70.14	72.49	76.56	80.33	81.23
R	6.70	7.16	9.44	1.87	15.67	9.92	22.24	8.02	6.19	12.98	17.52	20.61

根据正交设计的特性^[13],以考察环境因素对 DPB 降解 COD 的效能影响为例,若因素 A 对试验结果无影响,则有 $K_{A1} = K_{A2} = K_{A3}$,但由表 5 可知结果并非如此.根据 K_{Ai} 的大小判断 A1、A2、A3 对试验结果(COD 去除率)的影响大小,即 $K_{A2} > K_{A1} > K_{A3}$,由此可得 A2(丙酸钠为碳源)为环境因子 A(碳源类型)的优水平.同理可得, B3(碳源 COD 质量浓度 400 mg/L)、C3(25 °C)、D2(pH 为 7)为各个环境因子的优水平.比较各 R 值大小可得 $R_C > R_B > R_A > R_D$,由此可知,环境因子对于 DPB 的 COD 降解效能影响顺序为:C 因子(即进水温度)的影响力最大,B 因子(碳源质量浓度)和 A 因子(碳源类型)对 COD 去除效能的影响次之,D 因子(即进水 pH)的影响最小.

同理,考察不同环境因子使 DPB 脱氮效能最优的组合,可得 A2、B3、C2、D2 为各个环境因子的优水平,即当以丙酸钠为进水碳源,初始 COD 质量浓度 400 mg/L、进水温度 15 °C、pH 为 7 时,DPB 对于 TN 的去除率最高.比较各 R 值大小可得 $R_C > R_A > R_B > R_D$,由此可知,温度对 DPB 的脱氮效能影响最大,碳源类型和碳源质量浓度的影响略小,而 pH 的影响最小.此前,有学者针对温度这一单因素对污水脱氮系统效能的影响进行考察,认为在一定范围内,随温度的升高氮的去除率升高,但超过 25 °C 后,随着温度的上升氮的去除效果下降^[14].本试验结果与这一结论略有不同,原因是本试验为多因素的正交试验,获得的试验结果是 4 个环境因子对于 DPB 脱氮效能的综合影响.由表 5 可知,进水温度为 15 和 25 °C 时, K 值非常接近(分别为 244.13 和 238.24),且远高于 5 °C 时的 K 值(177.41),可认为温度在 15 ~ 25 °C 时,DPB 能够始终保持较高的脱氮效能.

同理,考察不同环境因子对 DPB 除磷效能最优的组合,可得 A1、B3、C3、D3 为各个影响因素的优水平,即当以乙酸钠为进水碳源、COD 质量

浓度 400 mg/L、进水温度 25 °C、pH 为 8 时,DPB 对于可溶性 P 的去除率最高.比较各 R 值大小可得 $R_D > R_C > R_B > R_A$,由此可知,pH 对 DPB 的除磷效能影响最大,温度和碳源质量浓度的影响略小,而碳源类型的影响最小.

2.3 反硝化除磷工艺优化运行策略

1) 温度对于以 DPB 为主体的生物脱氮除磷工艺的效能影响较大.较高的温度有利于系统的厌氧释磷、缺氧吸磷以及反硝化反应.当处理低温水时,可通过适当延长各阶段反应时间来提高系统的效能.

2) 进水碳源类型和质量浓度对于以 DPB 为主体的脱氮除磷工艺的运行效能影响略小.当进水碳源成分为乙酸钠和丙酸钠时,在厌氧阶段即可较好地被 DPB 吸收利用.当碳源成分较复杂时,在厌氧阶段难以被及时利用的有机物会在好氧阶段抑制 DPB 的硝化反应, NO_3^- -N 的不足会在缺氧阶段导致“二次释磷”现象的产生.进水碳源质量浓度较高有利于系统脱氮除磷效能的提升.当进水 COD 负荷过低或有机成分复杂时,适当投加简单碳源和延长厌氧反应时间,可以提高系统脱氮除磷效能.

3) pH 对 DPB 的有机物降解和脱氮效能影响较小,而对其除磷效能影响较大,pH 7 ~ 8 较为适宜.当系统 pH 较低时,厌氧释磷量显著降低,除磷效果明显变差.可以通过适当提高曝气量或延长好氧阶段时间来改善.

3 结 论

1) 以丙酸钠为碳源、COD 质量浓度 400 mg/L、进水温度 25 °C、pH 为 7 时,DPB 对于有机物的去除效能最高.温度对系统 COD 去除效能的影响最大,碳源质量浓度和类型的影响次之,而 pH 的影响最小.

2) 以丙酸钠为碳源、COD 质量浓度

400 mg/L、进水温度 15 °C、pH 为 7 时,DPB 的脱氮效能最高. 温度对系统脱氮效能的影响最大,碳源类型和质量浓度的影响略小,而 pH 的影响最小.

3) 以乙酸钠为碳源、COD 质量浓度 400 mg/L、进水温度 25 °C、pH 为 8 时,DPB 的除磷效能最高. pH 对系统的除磷效能影响最大,温度和碳源质量浓度的影响略小,而碳源类型的影响最小.

4) 反硝化除磷工艺的运行调控策略:温度对于以 DPB 为主体的生物脱氮除磷工艺的运行效能影响较大,可适当延长各阶段反应时间来提高低温系统的效能. 进水碳源类型和质量浓度对于系统的脱氮除磷效能影响略小. 系统的运行效果可以通过适当投加简单碳源和延长厌氧反应时间加以改善. pH 7~8 的环境对于系统较为适宜.

参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境状况公报. 北京: 国家环保局, 2010.
- [2] 马放, 杨菲菲, 张倩, 等. 一株高效反硝化聚磷菌的筛选及脱氮除磷效能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(12): 42-47.
- [3] 张晓昕, 邱珊, 杨基先, 等. 反硝化聚磷体系中颗粒污泥的特性研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(15): 85-87.
- [4] MURNLEITNER E, KUBA T, LOOSDREWCHT van M C M, *et al.* An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorous removal [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1997, 54(5): 434-450.
- [5] HU J Y, ONG S L, NG W J, *et al.* A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacteria by using three different types of electron acceptors[J]. *Water Research*, 2003, 37(12): 3463-3471.
- [6] MORGENROTH E, WILDER P A. Modeling of enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch biofilm reactor [J]. *Water Science and Technology*, 1998, 37(45): 583-587.
- [7] 吴昌永, 彭永臻, 王淑莹, 等. 强化反硝化除磷对 A²O 工艺微生物种群变化的影响[J]. 化工学报, 2010, 61(1): 186-191.
- [8] JIANG Xinxin, YANG Jixian, MA Fang, *et al.* Denitrifying phosphorous removal in anaerobic/anoxic SBR system with different start-up operation mode[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 17(6): 824-829.
- [9] WANG Yayi, JIANG Fan, ZHANG Zhaoxiang, *et al.* The long-term effect of carbon source on the competition between poly-phosphorus accumulating organisms and glycogen accumulating organism in a continuous plug-flow anaerobic/aerobic (A/O) process [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(1): 98-104.
- [10] 李楠. 低温除磷系统的性能及作用机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 2010: 18-19.
- [11] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 40-45.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] 汪容鑫. 数理统计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986: 120-148.
- [14] 张婷婷, 张建, 杨芳, 等. 温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1283-1287.

(编辑 刘 彤)